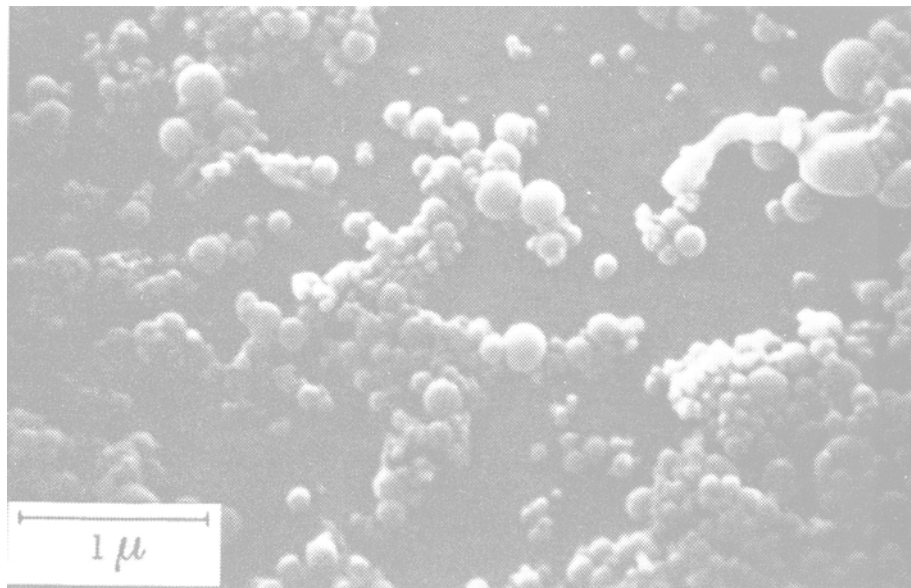


# PROPRIETA' DI MISCELE CEMENTIZIE CONTENENTI FUMO DI SILICE CONDENSATO.

M. Berra, S. Tavano

## 1. DEFINIZIONE E ORIGINE DEL FUMO DI SILICE CONDENSATO

I più significativi progressi nell'ambito dello sviluppo della tecnologia del cemento e del calcestruzzo di questi ultimi anni, e con molta probabilità degli anni a venire, riguardano l'impiego di materiali integrativi ottenuti come sottoprodotti di diversi processi industriali. Tra questi ultimi recentemente ha assunto importanza l'uso del fumo di silice condensato, grazie alla valorizzazione delle sue speciali ed uniche proprietà una volta aggiunto alle miscele cementizie. Questo materiale è una polvere di scarto ottenuta dai processi di produzione del silicio e delle leghe ferro-silicio nei forni di riduzione della quarzite [1]. Questi forni vengono riscaldati elettricamente per mezzo di elettrodi in modo da ottenere temperature intorno al 2000 °C necessarie alla reazione di riduzione durante la quale si sviluppano gas costituiti principalmente da monossido di silicio [2]. Il contatto di questo gas con aria porta ad una successiva ossidazione e il conseguente raffreddamento permette la condensazione del fumo di silice dando origine a un materiale con una tipica struttura amorfa, sotto forma di microsfele, normalmente denominato fumo di silice condensato (condensed silica fume) (fig. 1).



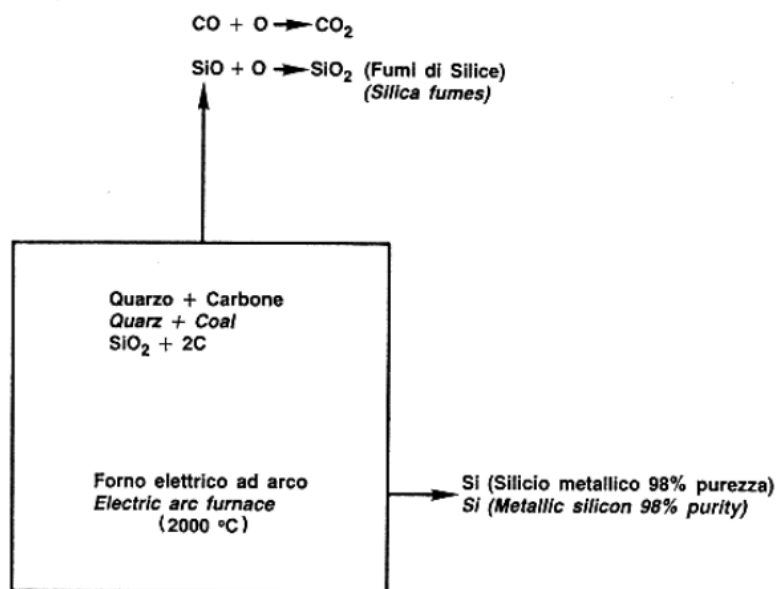
Questo materiale, estremamente fine, viene raccolto attraverso dei filtri a maniche e stoccato in opportuni silos. Fino alla fine degli anni 70 la polvere veniva granulata, depositata in discariche e considerata come scarto di produzione. Solo agli inizi degli anni 80, soprattutto per merito della Elkem Norvegese, il più grande produttore di silicio e di leghe ferro-silicio del mondo e della Aalborg Portland Cement Fabrik (Danimarca), il prodotto venne via via rivalutato e attentamente studiato per vari impieghi, in particolare nei conglomerati cementizi. A parte qualche sporadica pubblicazione precedente gli anni 70 [4], la maggior parte della letteratura scientifica sull'argomento è della fine degli anni 70 e soprattutto di questi primi anni 80. Nel 1982 la RILEM (Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Matériaux et les Constructions) ha istituito un apposito comitato 73 SBC sull'uso di sottoprodotti silicei nel calcestruzzo tra i cui scopi c'è anche quello dello studio del

fumo di silice. Si sono finora svolti quattro Congressi Internazionali riguardanti i materiali integrativi del calcestruzzo e il fumo di silice, rispettivamente a Trondheim (Norvegia) nel 1981 [5], a Montebello (Quebec - Canada) nel 1983 [6], a Monterrey (Mexico) nel 1985 [7] e a Madrid (Spagna) nell'Aprile '86 [8].

## 2. PRINCIPALI CARATTERISTICHE DEL FUMO DI SILICE

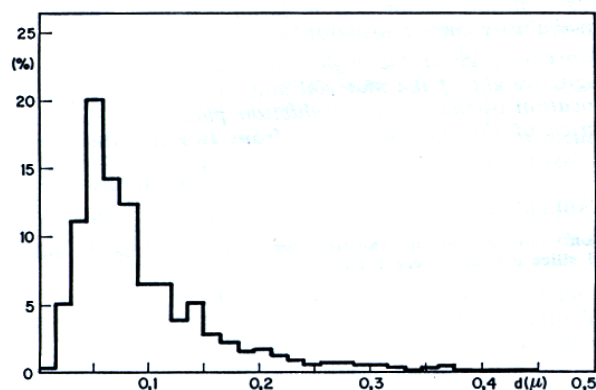
Il fumo di silice condensato si presenta sotto forma di polvere grigio biancastra con le seguenti caratteristiche chimico fisiche:

- peso specifico delle particelle 2,2 kg/dm<sup>3</sup>;
- peso specifico in mucchio 0,25 - 0,30 kg/dm<sup>3</sup>;
- superficie specifica 20 - 25 m<sup>2</sup>/g (200 - 250 x 10<sup>3</sup> Blaine);
- dimensioni delle particelle 0,01 - 0,50 μm.



1 - Fumi di silice come sottoprodotto della produzione del silicio metallico (schema semplificato) [3]

Una tipica analisi granulometrica è mostrata in fig. 2. Spesso le particelle del fumo di silice appaiono al microscopio sotto forma di ammassi globulari dalle dimensioni da 1 a 3 μm.



2 - Tipica analisi granulometrica di un fumo di silice  
 2 - Typical particle size distribution of silica fume

### Composizione chimica

Fra le caratteristiche di questo materiale è utile fare un accenno alla sua buona uniformità che dipende dalla purezza delle materie prime e dalla riproducibilità del processo chimico di produzione del silicio. Naturalmente la composizione chimica ed in particolare la percentuale di SiO<sub>2</sub> dipende dal tipo di lega prodotta. In Tabella 1 viene riportata la composizione chimica di 3 tipi di fumi di silice ottenuti rispettivamente dal processo di produzione di silicio metallico e leghe ferro-silicio al 90% e 74%.

### Attività pozzolanica

L'attività pozzolanica valutata con il Saggio Frattini risulta molto elevata [9]. Tale risultato è confermato anche applicando le norme ASTM C311 [10] e C618 [11] per le pozzolane naturali e le ceneri volanti, sebbene la richiesta d'acqua sia molto alta, tanto da non soddisfare, sotto questo aspetto, i limiti della ASTM C618 [2]. Questo fatto è giustificato considerando l'elevata superficie specifica del fumo di silice che causa una immediata reazione della silice con la calce di idrolisi producendo una forte coagulazione delle particelle [12] che, come si vedrà in seguito, potrà essere eliminata con l'impiego di opportuni disperdenti. Con ciò si evidenzia la sostanziale differenza tra il fumo di silice ed altri materiali con caratteristiche pozzolaniche come le ceneri volanti [13], dovuta essenzialmente alla finezza e al tenore di SiO<sub>2</sub> (Tabella II).

TABELLA I – Analisi chimiche di fumi di silice derivanti dalla produzione di silicio o di leghe di ferro-silicio

Costituenti Constituents	Si metallico Si metal	90% FeSi	74% FeSi
SiO <sub>2</sub>	94-98	92-95	86-90
SiC	0,20-1,00	0,2-0,5	0,1-0,4
C	0,20-1,30	0,5-1,2	0,8-2,3
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,02-0,15	0,2-0,8	0,3-1,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,10-0,40	0,4-1,0	0,2-0,6
CaO	0,08-0,30	0,1-0,5	0,2-0,6
MgO	0,30-0,90	0,5-1,2	1,0-3,5
Na <sub>2</sub> O	0,10-0,40	0,2-0,7	0,8-1,8
K <sub>2</sub> O	0,20-0,70	1,0-0,5	1,5-3,5
Altri - <i>Other</i>	0,10-0,50	0,4-0,8	0,5-0,9
Perdita al fuoco – L.o.i.	0,80-1,5	0,7-2,0	2,0-4,0

### 3. DISPONIBILITA', TRASPORTO, MANIPOLAZIONE E DOSAGGIO DEL FUMO DI SILICE

La produzione mondiale di fumo di silice condensato si aggira attorno al milione di tonn annue. I maggiori paesi produttori sono in ordine USA (300.000 tonn), URSS (150.000 tonn) e Norvegia (120.000 tonn). In Italia la produzione è stimata attorno alle 10.000 tonn annue. I dati si riferiscono al 1981 [3]. Un semplice confronto tra la produzione italiana di cenere volante (1.000.000 tonn annue) e di fumo di silice dimostra come l'utilizzo di questo materiale deve tener conto della sua scarsa disponibilità. Inoltre dati i notevoli costi di trasporto legati alla leggerezza del materiale e alla spesso sfavorevole localizzazione delle unità produttive di silicio, il prezzo del materiale franco destino oscilla da due a tre volte il prezzo del cemento.

TABELLA II – Confronto tra alcune caratteristiche chimico – fisiche del fumo di silice e della cenere volante.

	Fumo di silice Silica fume	Cenere volante Fly ash
Finezza - Fineness Blaine	200-250 x 10 <sup>3</sup>	3-7,5 x 10 <sup>3</sup>
SiO <sup>2</sup> %	86-98	30-50
Peso specifico delle particelle - Specific particle weight kg/dm <sup>3</sup>	2,2	1,9-2,4
Peso specifico in mucchio Volume weight kg/dm <sup>3</sup>	0,20-0,25	0,6-0,8

Tuttavia la sua utilizzazione può essere considerata vantaggiosa in relazione alle particolari proprietà, descritte più avanti, che conferisce agli impasti cementizi, soprattutto per impieghi speciali (calcestruzzi di alta qualità) [14]. Il fumo di silice è disponibile in forma di polvere (sfusa o in grandi sacchi) con peso specifico in mucchio di 0,20-0,25 kg/dm<sup>3</sup> oppure in forma di polvere compattata per aumentarne il peso specifico in mucchio fino a 0,40-0,50 kg/dm<sup>3</sup>. Inoltre, miscelato con acqua può essere disponibile in forma di slurry (50% acqua) con peso specifico di 1,4 kg/dm<sup>3</sup> e consegnato in autobotti. Infine si può trovare anche in forma granulare, poiché una buona parte viene pellettizzata per esigenze di stoccaggio. Tuttavia deve essere ancora verificata l'efficacia del fumo di silice in questa ultima forma. Il caricamento della polvere in opportuni silos presso i cantieri può essere effettuato, come per il cemento, con mezzi pneumatici; viceversa l'estrazione dai silos richiede l'insufflaggio di aria dal fondo, mentre non è efficace l'uso di vibratori. Data la leggerezza del materiale il dosaggio viene effettuato per lo più con l'impiego di dosatori volumetrici. Se si fa uso dello slurry è consigliabile ricorrere a pompe adatte al trasporto di sospensioni viscosi. Il dosaggio consigliato nel calcestruzzo varia da un 5% a un 20% in peso sul cemento: in assenza di fluidificanti, maggiore è la quantità impiegata più elevata risulterebbe la richiesta d'acqua: ne consegue la necessità di un costante uso di fluidificanti per tutti gli impasti cementizi contenenti fumo di silice. Esperienze norvegesi hanno dimostrato che i fluidificanti hanno un effetto molto più marcato in questi ultimi che nel calcestruzzo ordinario [15].

#### 4. MODALITA' D'IMPIEGO E MECCANISMO D'AZIONE DEL FUMO DI SILICE NEL CALCESTRUZZO

Nei conglomerati cementizi il fumo di silice può essere sostanzialmente utilizzato in 2 modi:

- In sostituzione del cemento, per ragioni economiche e per diminuire il calore di idratazione.
- In aggiunta al cemento per migliorare alcune proprietà delle paste, delle malte e dei calcestruzzi, soprattutto allo stato indurito.

L'uso in sostituzione del cemento è fattibile quando il rapporto dei costi fumo di silice/cemento è intorno a 2 [14]. Per quantificare il vantaggio della sostituzione del cemento con fumo di silice viene spesso citato in letteratura il coefficiente di efficacia K definito attraverso l'equazione [16]:

$$(a/c)R = (a/(c + Ks))s$$

dove:

R = calcestruzzo di riferimento

S = calcestruzzo con fumo di silice

a = acqua totale

c = dosaggio di cemento

s = dosaggio di fumo di silice

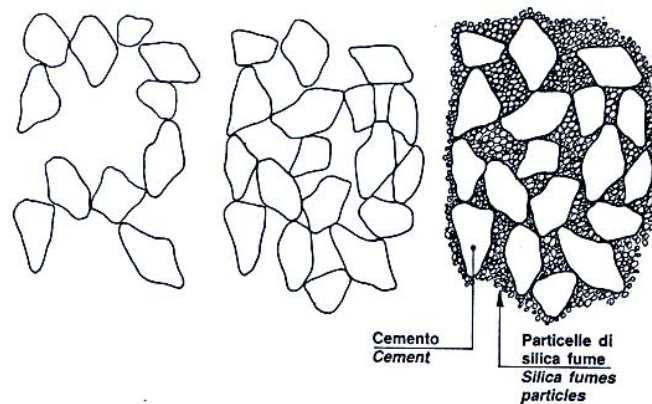
Tale coefficiente si basa sull'assunto che le proprietà di un calcestruzzo sono funzione del rapporto  $a/c$ . Applicando il fattore K alla quantità di fumo di silice aggiunto, essa è convertita in una equivalente quantità di cemento. Il valore di K deve essere determinato sperimentalmente per ogni singola proprietà e tipo di calcestruzzo: per le resistenze meccaniche, ad esempio, quello più ricorrente in letteratura è pari a 3 [16]. Invece l'aggiunta di fumo di silice al cemento può essere indispensabile quando si vuole ottenere il raggiungimento di elevatissime resistenze con metodi di routine oppure si vogliono migliorare alcune proprietà come la permeabilità, la resistenza al gelo e disgelo, la resistenza agli attacchi chimici, la resistenza alla reazione alcali-aggregati e l'aderenza alle barre d'armatura. Alla base di queste migliorate proprietà del calcestruzzo indurito esistono due distinte funzioni esercitate dal fumo di silice: una funzione pozzolanica derivante dalla natura chimico-fisica e mineralogica del materiale (attività pozzolanica) e una funzione di filler dovuta esclusivamente all'estrema finezza delle sue particelle, circa 50 volte maggiore di quella del cemento. In effetti quest'ultima funzione si esplica grazie alla dimensione delle particelle del fumo di silice (0,01-0,5  $\mu\text{m}$ ) che vanno a riempire i vuoti tra le più grosse particelle di cemento (1-100  $\mu\text{m}$ ) (fig. 4). Si ottiene in questo modo un sistema densamente compattato che lascia a disposizione dell'acqua un minor volume. Ciò fa sì che il rapporto  $a/e$  al momento del confezionamento dell'impasto possa scendere a valori molto bassi, a condizione che venga usato un agente fortemente disperdente (superfluidificante) [17]. Il meccanismo d'azione del disperdente è basato su due fenomeni: il primo d'impedimento sterico e il secondo di repulsione elettrostatica fra le particelle caricate negativamente [18]. Si ha perciò come conseguenza un più efficace utilizzo del fumo di silice come filler ed inoltre l'assorbimento in strato monomolecolare del disperdente da parte delle particelle di silice impedisce una reazione troppo rapida con la calce di idrolisi eliminando la possibile coagulazione iniziale delle particelle stesse [12]. Normalmente i fluidificanti - disperdenti impiegati sono a base di ligninsolfonati, naftalensolfonati e melammine - solfonate. Tuttavia il più indicato appare il naftalensolfonato perché si tratta di un prodotto di sintesi a forte azione disperdente (maggiore della melamina solfonata) senza la presenza di componenti secondari (presenti invece nei ligninsolfonati) con effetti collaterali. I ligninsolfonati, viceversa, non sono prodotti di sintesi ma sottoprodotti di lavorazione della carta e hanno una costituzione chimica variabile, pur entro certi limiti. Questi prodotti consentono, in conclusione, di sfruttare al massimo le potenziali caratteristiche insite nel fumo di silice.

## **5. INFLUENZA DEL FUMO DI SILICE SULLE PROPRIETA' DEL CALCESTRUZZO FRESCO E INDURITO**

### **5.1 Calcestruzzo fresco**

L'aggiunta di fumo di silice aumenta la viscosità del calcestruzzo allo stato fresco, consentendo il confezionamento di impasti più coesivi [19] ma richiedendo al tempo stesso maggiore energia di miscelazione e di compattazione. A questo riguardo si è trovato, in base all'esperienza, che per avere la stessa lavorabilità dinamica (tavola a scosse) occorre che i calcestruzzi contenenti fumo di silice abbiano una lavorabilità statica

(slump) più elevata [16]. Tuttavia la maggior coesione consente di realizzare senza problemi calcestruzzi autolivellanti senza segregazione. Inoltre gli impasti con fumo di silice presentano un bleeding fortemente ridotto che, pur essendo per alcuni aspetti un fattore positivo, ha come conseguenza un maggior rischio di fessurazioni da ritiro plastico [17]. E' indispensabile pertanto una più accurata maturazione del calcestruzzo proteggendolo immediatamente dopo il getto, laddove possibile, con agenti di curing o con altri mezzi adeguati allo scopo. La necessità dell'uso di fluidificanti disperdenti negli impasti contenenti fumo di silice conduce a dei ritardi dei tempi di presa, particolarmente accentuati quando il dosaggio di fluidificante è molto elevato [17]. Tuttavia esperienze pratiche dimostrano [16, 20] che i calcestruzzi con fumo di silice possono tollerare dosaggi più elevati di fluidificanti che non i calcestruzzi ordinari. Infine il basso calore di idratazione delle miscele cemento e fumo di silice consente di ridurre il pericolo di fessurazione connesso con le variazioni di temperatura conseguenti all'idratazione stessa [21].



## 5.2. Calcestruzzo Indurito

### 5.2.1. RESISTENZA MECCANICA

Tralasciando di esaminare i casi in cui il fumo di silice viene utilizzato in sostituzione del cemento per ragioni di tipo economico, di seguito vengono presi in considerazione i risultati ottenibili attraverso l'aggiunta di questo materiale al cemento. In tal caso potendo ridurre, grazie all'uso combinato con il fluidificante, il rapporto acqua/cemento, è possibile ottenere, anche con processi di routine, delle elevatissime resistenze sia alle brevi (1-3 gg.) che alle lunghe stagionature (28-90 gg.), superando rispettivamente i 60 MPa e 120 MPa [18,22]. Anche nei calcestruzzi leggeri confezionati con fumo di silice si possono raggiungere, pur con pesi specifici da 1,3 a 1,5 t/m<sup>3</sup>, resistenze a 28 giorni comprese tra 25 e 40 MPa [23].

### 5.2.2. RITIRO

L'impiego di solo fumo di silice nei conglomerati cementizi potrebbe aumentarne il ritiro da essiccamento, in relazione alla maggior richiesta d'acqua. Tuttavia, poiché si fa uso normalmente anche di fluidificanti, si può considerare che il ritiro sia dello stesso ordine di grandezza di un calcestruzzo ordinario [24]. Nel caso in cui invece di un normale fluidificante viene utilizzato un superfluidificante ad alto dosaggio, raggiungendo rapporti acqua/cemento estremamente bassi ( $a/(e + s)$  circa 0,2), il ritiro è proporzionalmente ridotto [17].

### 5.2.3. POROSITA' E PERMEABILITA'

Recenti studi [25] sulla struttura dei pori di paste di cemento additivate con fumo di silice hanno dimostrato che, a pari rapporto a/c, pur non cambiando il volume totale dei pori, si ha una riduzione della loro dimensione media. Pertanto il volume dei pori capillari ( $> 0,05 \mu\text{m}$ ) risulta notevolmente diminuito in rapporto alla porosità totale, con conseguente riduzione della permeabilità. I vantaggi più marcati si ottengono per i calcestruzzi con bassi dosaggi di cemento. A tale riguardo alcuni autori [26] hanno trovato che in calcestruzzi con  $100 \text{ kg/m}^3$  di cemento l'aggiunta del 10% di fumo di silice consente una diminuzione della permeabilità da  $1,6 \times 10^{-7}$  a  $4 \times 10^{-11} \text{ m/s}$ . Nello stesso caso con il 20% di fumo di silice si raggiunge la permeabilità di un normale calcestruzzo con  $250 \text{ kg/m}^3$ . I dati disponibili evidenziano come la presenza del fumo di silice nel calcestruzzo migliora la permeabilità più di quanto siano migliorate le resistenze meccaniche [16]. L'uso di superfluidificanti migliora ulteriormente la permeabilità fino ad ottenere un coefficiente di efficacia di circa 10 [26].

### 5.2.4. RESISTENZA AL GELO E DISGELO

La sostanziale riduzione della porosità capillare, ottenuta grazie all'aggiunta del fumo di silice, consente di limitare notevolmente la quantità di acqua congelabile nelle paste di cemento. Ciò riduce i danni provocati dalle alternanze di gelo e disgelo, anche in presenza di sali disgelanti, come è ampiamente verificato negli studi sperimentali riportati in letteratura [26, 27]. Anche per la resistenza al gelo, così come per la permeabilità, il miglioramento dovuto alla presenza di fumo di silice è superiore a quello ottenibile per le resistenze meccaniche [26]. Naturalmente, come per i calcestruzzi ordinari, l'aria occlusa ne migliora la resistenza al gelo. Tuttavia l'utilizzo di fumo di silice combinato con un fluidificante ed un basso rapporto  $a/(c + s)$  consente la produzione di miscele cementizie resistenti al gelo anche senza l'uso di aeranti [17, 18, 28].

### 5.2.5. RESISTENZA AGLI ATTACCHI CHIMICI

Il fattore chiave che governa la velocità del deterioramento di un calcestruzzo esposto agli attacchi chimici è la sua permeabilità. Poiché l'aggiunta del fumo di silice riduce la permeabilità, l'eventuale degrado si manifesterà in tempi più lunghi. Inoltre sono fattori coadiuvanti all'aumento della resistenza chimica la reazione di tipo pozzolanico, che sottrae idrossido di calcio al sistema, e la maggior quantità di ioni alluminio bloccati dai prodotti di idratazione del fumo di silice, tali da ridurre la quantità di allumina disponibile per la produzione di ettringite [16, 29]. Recenti ricerche di alcuni autori [30] hanno dimostrato che un calcestruzzo modificato con 15% di fumo di silice sottoposto a diversi tipi di attacco resiste più a lungo di un buon calcestruzzo di riferimento confezionato con basso rapporto acqua/cemento ( $a/c = 0,33$ ), cfr. Tabella III. Per quanto riguarda in particolare la resistenza ai solfati un altro studio [31] ha evidenziato come un calcestruzzo con un 15% di fumo di silice presenta, dopo 26 anni di esposizione ad una soluzione contenente fino a  $5 \text{ gr/l}$  di  $\text{SO}_3$  e con pH fino a 2,8, la stessa resistenza di un calcestruzzo confezionato con cemento resistente ai solfati.

### 5.2.6. RESISTENZA ALLA REAZIONE ALCALI-AGGREGATI

L'azione preventiva del fumo di silice nei riguardi della reazione alcali-aggregati può essere spiegata dalla capacità delle microparticelle di questo materiale di ridurre assai rapidamente, attraverso legami chimico-fisici, la concentrazione degli alcali nella soluzione acquosa dei pori, in modo da sottrarli a successive e più lente reazioni con gli aggregati reattivi [29, 32, 33]. Tra tutti i materiali ad attività

pozzolanica il fumo di silice rappresenta quello a maggiore efficacia nella prevenzione dell'espansione alcalina [34]. Un dosaggio intorno al 20% in sostituzione del cemento consente di eliminare i pericoli di espansione anche con aggregati molto reattivi [35]. Nei riguardi della reazione aleali-aggregati va sottolineato che il ruolo dei superfluidificanti non è del tutto chiaro perché in loro presenza si sono verificati, in alcuni casi, aumenti delle espansioni [35]. Perciò sarebbe consigliabile quantomeno utilizzare prodotti esenti da alcali (sali di calcio).

TABELLA III – Tempo in giorni per ottenere una perdita di peso del 25% a 20°C  
Time in days to obtain a weight loss of 25% at 20°C

SOLUZIONI - <i>Solution</i>	Cls + 15% fumo di silice With 15% silica fume $a-w/(c+s)=0,33$	Cls di riferimento Reference concrete $a/c - w/c = 0,33$
1% HCl	63	39
5% Acido acetico - Acetic acid	168	48
1% Acido lattico - Lactic acid	182	110
1% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	(*)	105
5% (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	120	120
5% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Nessuna perdita di peso	Nessuna perdita di peso

(\*) Perdita in peso del 20% alla fine della prova (182 giorni) [30].  
20% weight loss at the end of the test (182 days) [30].

#### 5.2.7. ADERENZA ALLE BARRE D'ARMATURA E LORO PROTEZIONE DALLA CORROSIONE

L'aderenza del calcestruzzo con fumo di silice all'interfaccia pasta cementizia-barre d'armatura è migliorata dalla funzione di filler esercitata dalle microparticelle di questo materiale. In base alla stessa funzione analoghi miglioramenti sono prevedibili per l'aderenza della pasta con aggregati, eventuali fibre [36] e superficie di contatto tra calcestruzzo vecchio e calcestruzzo nuovo. Risultati di alcune prove di pull-out [17] dimostrano che impasti contenenti fumo di silice consentono sensibili incrementi nelle resistenze allo filamento di barre di acciaio. Nei confronti della protezione delle armature dalla corrosione la presenza di fumo di silice comporta aspetti negativi e positivi. L'aspetto negativo riguarda la diminuzione del pH, sebbene con una aggiunta di non oltre il 10% non si abbiano valori inferiori alla soglia critica [26]; gli aspetti positivi riguardano invece la riduzione della profondità di penetrazione dei cloruri provenienti dall'esterno, la minor diffusione dell'ossigeno e la diminuzione della conducibilità elettrica. Queste caratteristiche sono direttamente correlate con la compattezza e la scarsa permeabilità delle paste di cemento modificate con l'aggiunta di fumo di silice. Risultati sperimentali [26] infine mostrano come la velocità di carbonatazione non è influenzata dalla presenza di questo materiale a meno che non venga utilizzato insieme ad un superfluidificante. In tal caso la velocità di carbonatazione viene ridotta [37].

#### 5.2.8. RESISTENZA ALL'ABRASIONE

Sono rari in bibliografia i lavori riguardanti la resistenza all'abrasione di calcestruzzi modificati con fumo di silice. Tuttavia, in base alle caratteristiche fisico-meccaniche fin qui descritte, è ipotizzabile che tali calcestruzzi, opportunamente additivati con



superfluidificanti, presentino prestazioni superiori a quelle di altri materiali usualmente impiegati per resistere all'abrasione. Confronti tra le prestazioni antiusura di un prodotto speciale a base di fumo di silice e quelle del basalto fuso, misurate secondo l'ANSI/ASTM C704 [38], garantiscono valori superiori da 2 a 4 volte [39].

## 6. APPLICAZIONI NELL'INDUSTRIA DEL CALCESTRUZZO

Sebbene esistano numerosi rapporti scientifici e tecnologici sull'impiego del fumo di silice nel calcestruzzo, ci sono finora solo limitate applicazioni a livello industriale [40]. Pur tuttavia vengono citati alcuni esempi di applicazione in campi diversi:

a) Nella costruzione di silos per lo stoccaggio di fertilizzanti, in Norvegia, e in relazione ad un prevedibile attacco chimico da parte del nitrato di calcio  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ , è stato usato come legante una miscela di cemento ad alta resistenza ai solfati e fumo di silice [41]. Contemporaneamente è stata sviluppata una tecnica per la riduzione del rapporto a/c di circa il 50% per mezzo di una combinazione di un fluidificante con un superfluidificante. La miscela finale ha assunto la seguente composizione:

- Cemento resistente ai solfati + fumo di silice	300 kg/m <sup>3</sup>
- Sabbia 0/8	920 kg/m <sup>3</sup>
- Aggregato 8/19	185 kg/m <sup>3</sup>
- Aggregato 16/32	735 kg/m <sup>3</sup>
- Acqua + umidità dell'aggregato	112 kg/m <sup>3</sup>
- Superfluidificante + fluidificante	19 kg/m <sup>3</sup>
- Aerante	0,15 l/m <sup>3</sup>

Il calcestruzzo ha avuto le seguenti caratteristiche:

- aria occlusa nel calcestruzzo fresco	8 %
- resistenza a compressione (28 gg)	65 MPa
- permeabilità misurata attraverso la penetrazione dell'acqua sotto una pressione di 5 bar	0,5 cm

1. Nell'ambito delle opere idrauliche e in particolare nella ristrutturazione del fondo di una condotta in roccia per l'evacuazione della piena è stata impiegata una malta premiscelata modificata con fumo di silice e superfluidificanti, al fine di assicurare una più duratura resistenza all'erosione dell'acqua [42]. All'atto del confezionamento dell'impasto sono state aggiunte fibre d'acciaio di dimensioni 0,4 X 2,5 mm in ragione di 125 kg/m<sup>3</sup>. La quantità d'acqua impiegata è stata di 2,5-3,3 litri per ogni 40 kg di premiscelato con un rapporto a/(c+s) presumibilmente compreso tra 0,10 e 0,20. Le resistenze ottenute sono risultate tra 150 e 270 MPa.
2. Infine viene presentato un esempio di applicazione che non fa riferimento ad impieghi speciali o manufatti prefabbricati ma a un getto massivo quale la realizzazione di una diga in Norvegia [43]. Ciò è stato possibile in relazione alla maggiore disponibilità di fumo di silice esistente in quel paese. La composizione del calcestruzzo ha previsto un impiego combinato di fumo di silice e cenere volante con un rapporto ponderale cemento Portland, cenere volante e fumo di silice pari a 70: 23 : 7. Nel corpo diga il dosaggio di legante è stato di 160 kg/m<sup>3</sup> con un rapporto a/(c+s) = 0,63. Sono stati utilizzati sia un agente riduttore d'acqua che un agente aerante. La resistenza a 90 giorni di stagionatura è stata di 40 MPa. Per concludere, i vantaggi derivanti dall'uso del fumo di silice nei calcestruzzi di tale diga sono stati:
  - Lunghi tempi di presa (16-24 ore a causa dell'alto dosaggio di additivi) che hanno permesso di riprendere i getti il giorno dopo, senza giunti freddi.
  - Elevate resistenze tali da permettere l'ancoraggio delle cassaforme e il nuovo getto entro 3 giorni.

- Ridotto calore di idratazione per la sostituzione di 3 parti di cemento con una sola di fumo di silice.
- Impermeabilità.
- Resistenza al gelo in relazione all'uso combinato con l'aerante.

## 7) **CONCLUSIONI**

Il fumo di silice è un materiale con un'alta efficienza pozzolanica e con una rimarcabile funzione di filler. La disponibilità di superfluidificanti ne ha reso possibile il corretto impiego negli impasti cementizi solo negli ultimi anni. Tuttavia, a causa della sua scarsa disponibilità, la sua utilizzazione dovrebbe essere confinata ad impieghi speciali in modo da ricavare il massimo vantaggio dalle sue proprietà uniche. In particolare l'uso consigliabile è in aggiunta al cemento per migliorare le proprietà delle paste, delle malte e dei calcestruzzi: resistenza meccanica, permeabilità, resistenza al gelo e disgelo, agli attacchi chimici, alla reazione alcali-aggregati, aderenza alle barre d'armatura e resistenza all'abrasione.

## 8) **BIBLIOGRAFIA**

- [1] AITCIN P.C., RAU G.: «Valorization of condensed silica fume from silicon and ferrosilicon plants », Seminar of Mineral Fillers, Toronto, October 1981.
- [2] PISTILLI M.F., WINTERSTEEN R., CECHNER R.- «The uniformity and influence of silica fume from U.S. source on the properties of portland cement concrete», Cement, Concrete and Aggregates (ASTM), Vol. 6, N. 2, 120-124 (1984).
- [3] MALHOTRA V.M., CARETTE G.G.: «Silica fume concrete - Properties, applications and limitations», Concrete International, 40-46, May, 1983.
- [4] BERNHARDT C.J.- «SiO<sub>2</sub> - Fume as cement addition», Betongen Idag, Vol. 17, 29-53, Aprile 1952.
- [5] NORDIC MINISEMINAR: «Silica fume in concrete», Techn. University of Norway, Trondheim, Dic., 10, 1981.
- [6] FIRST INTERNATIONAL CONFERENCE ON: "Fly ash, Silica fume and other mineral by-products in concrete", Quebec (Canada), Agosto - 1983.
- [7] JOINT SYMPOSIUM ON «Technology of concrete - When pozzolans, slags and chemical admixtures are used ». Monterrey, N.L. (Mexico), Marzo 10-15, (1985).
- [8] SECOND INTERNATIONAL CONFERENCE ON «The use of fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete», Madrid, Aprile 21-25, 1986.
- [9] TRÆTTEBERG A.: «Silica fumes as a pozzolanic material», Il Cemento, Vol. 3, 369-376 (1978).
- [10] ASTM: «Standard methods of sampling and testing fly ash or natural pozzolans for use as a mineral admixture in portland cement concrete», in ASTM C 311-77.
- [11] ASTM: «Standard specification for fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in portland cement concrete», in ASTM C 618-84.
- [12] BUIL M.- «Quelques techniques récentes d'obtention de pâtes de ciment à très hautes résistances - Etude bibliographique», Bull. Liaison Labo. P. et Ch., n. 134, 67-74 (1984).
- [13] PUCCIO M.: «Le ceneri di carbone», Ed. ITEC, Milano, 1983.
- [14] JAHREN P.: «Use of silica fume in concrete », ACI Publication SP-79, Vol. 11, 625-642 (1983).
- [15] SELLEVOLD E.J., RADJY F.F.: «Condensed silica fume (microsilica) in concrete: Water demand and strength development», ACI Publication SP-79, Vol. 11, 677-694 (1983).

- [16] SELLEVOLD E.J.: « Review: Microsilica in concrete », Elkem Chemicals, Jan. (1984).
- [17] BERRA M., TAVANO S.: «Malte cementizie speciali con fumo di silice», Rapporto interno ENEL (1985).
- [18] BACHE H.H.: «Densified cement-ultra fine particle-based materials», 2nd International Conference on Superplasticizers in Concrete, Ottawa, June 10-12, 1981.
- [19] SKRASTINS J.J., ZOLDNERS N.G.: «Ready mixed concrete incorporating condensed silica fume», ACI Publication SP-79, Vol. II, 813-829 (1983).
- [20] MELAND I.: «Influence of condensed silica fume and fly ash on the heat evolution in cement pastes », ACI Publication SP-79, Vol. 11, 665-676 (1983).
- [21] RASMUSSEN T.H.: «Low heat concrete containing PFA silica powder and superplasticizer», CBL Internal Report N. 28, Aalborg, Denmark, 1981.
- [22] WOLSLEFER J.: « Ultra high-strength field-placeable concrete in the range 10000 psi to 18000 psi», 1982 annual Convention in Atlanta, Georgia, American Concrete Institute, January 1982.
- [23] BURGE T.A.: «High strength lightweight concrete with condensed silica fume», ACI Publication SP-79, Vol. 11, 731- 745 (1983).
- [24] CARETTE G.G., MALHOTRA V.H.: «Mechanical properties, durability, and drying shrinkage of portland cement concrete incorporating silica fume», Cement, concrete and aggregates (ASTM), Vol. 5, n. 1, 3-13 (1983).
- [25] SELLEVOLD E.J., BAGER D.H., KLITGAARD J.K.- «Silica fume-cement pastes: hydration and pore structure», Report n. 82610, Division of Building Materials, The Norwegian Institute of Technology, Trondheim, Norway, Feb. 1982.
- [26] GJORV O.E.. «Durability of concrete containing condensed silica fume», ACI Publication SP-79, Vol. 11, 695-708 (1983).
- [27] AITCIN P.C., VEZINA D.: «Resistance to freezing and thawing of silica fume concrete», Cement, concrete and aggregates (ASTM), Vol. 6, n. 1. 38-42 (1984).
- [23] SORENSEN E.V.: «Freezing and thawing resistance of condensed silica fume (microsilica) concrete exposed to deicing chemicals», ACI Publication SP-79, Vol. II, 709-718 (1983).
- [29] DIAMOND S.: «Effect of microsilica (silica fume) on pore solution chemistry of cement pastes», J. American Ceramic Society, Vol. 66, n. 5, Maggio - May 1983.
- [30] METHA P.K.. «Chemicals resistance of concrete containing latex or silica fume as admixtures», Elkem Chemicals (1984).
- [31] FiSKAA O.M.: «Concrete in alum shale», Norwegian Geotechnical Institute, Report n. 101, 12, Oslo (1973).
- [32] PAGE C.L., VENNESLAND O.: «Pore solution composition and chloride binding capacity of silica fume cement pastes», RILEM, Materials and Structures, Vol. 16, n. 91 (1983).
- [33] MARR J., GLASSER F.P.: «Effect of silica, PFA and slag additives on the composition of cement pore fluids», Proceedings 6th International Conference Alkalis in Concrete, 239-242, Copenhagen 22-25, June 1983.
- [34] OBEHOLSTER R.E., WESTRA W.B.:«The Effectiveness of mineral admixtures in reducing expansion due to AAR with molmesbury group aggregates», Proceedings 5th International Conference on Alkali-Aggregate Reactions in Concrete, Cape Town, Paper n. S 252/31, Apr. 1981.
- [35] PERRY C., GILLOR I.E.: «The feasibility of using silica fume to control concrete expansion due to alkali-aggregate reaction», Manoscritto presentato all'ACI meeting - Montebello, Canada, Agosto 1983.

- [36] YOSHIHIKO O., MIKIO A., MITSUHIRO E.: «Properties of carbon fiber reinforced cement with silica fume», 58-62, Concrete International, March 1985.
- [37] VENNESLAND O., GJORV O.E.: «Silica concrete - Protection against corrosion of embedded steel», ACI Publication SP- 79, Vol. II, 719-729 (1983).
- [38] ASTM: "Standard test method for abrasion resistance of refractory materials at room temperature", in ANSI/ASTM C 704-76a.
- [39] HUMMERT G.: Personal report, 1984.
- [40] METHA P.K.: «Pozzolanic and cementitious by-products as mineral admixtures for concrete - A critical review», ACI Publication SP-79, Vol. I, 1-46 (1983).
- [41] STEINAR H.: « Slipforming of concrete with low water content», Concrete, 19-21, Dec. 1984.
- [42] HUMMERT G.: «Densit-Stahlfaserbeton im Wasserbau», Wasserwirtschaft, Vol. 72, n. 4, 181-182 (1982).
- [43] BOERSETH I.: «Use of silica in the Farrevass dam », 15th International Congress on Large Dams, Lausanne (Suisse), 24-28 June 1985, Vol. 11, 519-527, Q.57, R.30.

**Proprietà di miscele cementizie contenenti fumo di silice condensato - Riassunto –**

Il fumo di silice condensato è un sottoprodotto derivante dalla riduzione della quarzite nella produzione di leghe ferro-silicio o silicio metallico ed è in grado di esplicare sia una funzione pozzolanica che una funzione di filler. Nella memoria vengono descritte le sue proprietà fisiche, chimiche e pozzolaniche e le sue possibili applicazioni negli impasti cementizi. L'uso consigliabile è in aggiunta al cemento per migliorare le proprietà di durabilità delle paste, delle malte e dei calcestruzzi.

**Properties of cement mixes containing condensed silica fume - Synopsis –**

Condensed silica fume is a by-product resulting from the reduction of quartzite in the manufacture of ferrosilicon and silicon metal and it is able to display both pozzolanic and filler effects. Its physical, chemical and pozzolanic properties are described in this paper, together with the possible applications in cement mixes. The utilisation as an addition to improve the durability properties of pastes, mortars and concrete is recommended.

**Propriétés des mélanges de ciment avec la fumée de silice - Résumé –**

La fumée de silice condensée est un sous-produit provenant de la réduction du quartzite dans la production d'alliages ferrosilicieux, ou silicium métallique, et peut exercer tant une fonction pouzzolanique qu'une fonction de filler. Dans la mémoire sont indiquées ses propriétés physiques, chimiques et pouzzolaniques, ainsi que ses applications possibles dans les mélanges de ciment. Comme emploi, il est conseillé de l'ajouter au ciment pour améliorer les propriétés de durabilité des pâtes, des mortiers et des bétons.

**Eigensehaften der Zementsand-Gemische, die kondensierten Kieselsäure-Rauch Enthalten - Zusammenfassung –**

Der kondensierte Kieselsäure-Rauch ist ein Nebenprodukt, das aus der Reduktion von Quarzit bei der Herstellung von Eisen/Silizium-Legierungen oder Metallsilizium-Legierungen entsteht und imstande ist, sowohl eine Trass-Funktion als auch eine Füllfunktion zu entfalten. Im Memorandum werden seine physikalischen, chemischen und trassartigen Eigenschaften und seine möglichen Anwendungen bei Zementbindungen beschrieben. Die empfohlene Anwendung versteht sich als Zusatz zum Zement, um die Haltbarkeit der Leime, der Mörte und des Betons zu verbessern.